

# 2次元シート材料を用いた 完全透明太陽電池の開発

東北大学 大学院工学研究科

准教授 加藤 俊顕

2022年7月14日

# 環境調和型太陽電池

様々な環境



自然



都市

環境に調和できる環境発電素子

Soc. 5.0

SDGs



環境発電素子

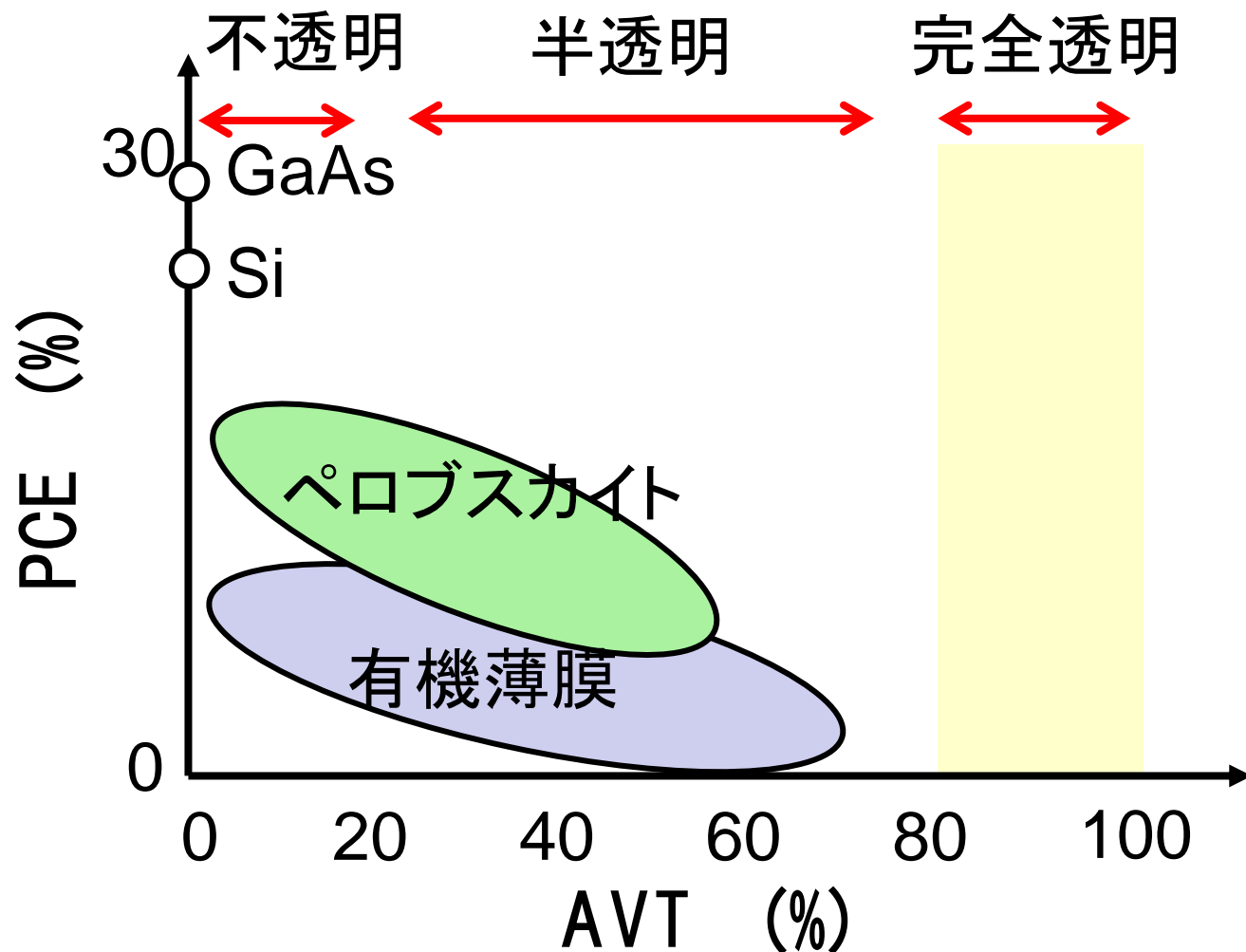
設置により環境を乱さない

デバイスへの要求

- 透明性
- 柔軟性
- 軽量性

# 透明太陽電池

Christopher J. et al., Nature Energy, 2017, 849-860.



AVT: 平均可視光透過率  
PCE: 電力変換効率

ほぼ全ての太陽電池が可視光透過率60%以下



完全に透明な太陽電池は未開拓領域

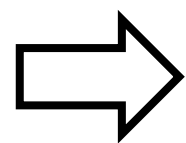
## 従来技術とその問題点

透明太陽電池という名前で既に商品は販売されているが、

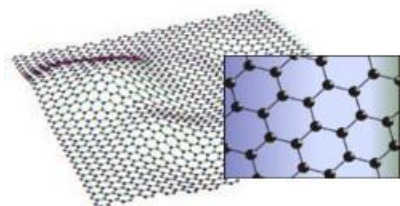
透明度の定義が曖昧

透過率30～60%のものがほとんどであり、

存在が認識できないほど透明ではない



設置により環境が乱れてしまう



グラフェン

## バンドギャップ

単層  
0

多層  
0

金属

ボロンナイトライド

5.2 eV

5.2 eV

絶縁体

層状遷移金属  
ダイカルコゲナイド  
(TMD)

MoS<sub>2</sub>

1.89 eV  
(直接遷移)

1.23 eV  
(間接遷移)

MoSe<sub>2</sub>

1.58 eV  
(直接遷移)

1.09 eV  
(間接遷移)

WS<sub>2</sub>

2.05 eV  
(直接遷移)

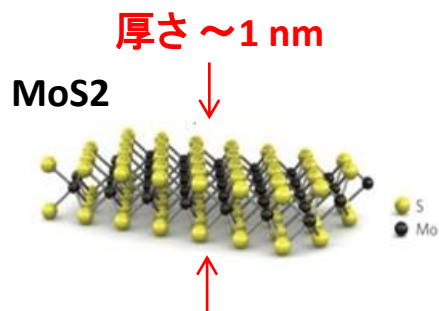
1.35 eV  
(間接遷移)

WSe<sub>2</sub>

1.61 eV  
(直接遷移)

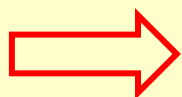
1.20 eV  
(間接遷移)

半導体



A. Kumar *et al*, Eur. Phys. J. B 85, (2012) 186.  
K. Kam *et al*, J. Phys. Chem. 86, (1982) 463.  
M. Bernardi *et al.*, Nano Lett. 13, (2013) 3664

- ✓ 単層における光吸収率が5-10% (Solar light)
- ✓ GaAsやSiに比べて出力密度 (kW/kg)が10-100倍程度高い



高効率透明太陽電池の発電層材料として最適

## 一般的な太陽電池

- PN接合型
- ヘテロ接合型
- ショットキー型
- 色素増感型
- 量子ドット型

## 単層～数層TMD太陽電池

- ✓ PN接合型
- ✓ ヘテロ接合型

H. Li, D. Lee *et al.* Nat communications. **6**, (2015) 6564  
Baugher B. W. H. *et al.* Nat Nanotechnol. **9**, (2014) 262

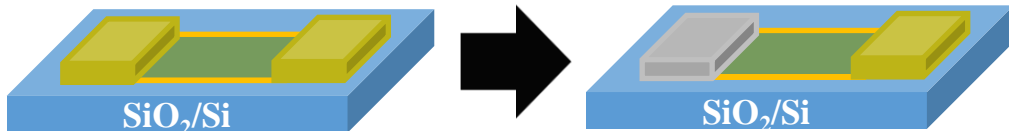
✓ デバイス構造が複雑であるため大面積化が困難(実用化が難しい)

### ✓ ショットキー型

- ✓ 電極をパターンニングする簡単な手法のため大面積化が可能 (実用化に期待)
- ✓ 現在のところ高効率発電の報告がなされていない

## 未解決課題

ショットキー太陽電池



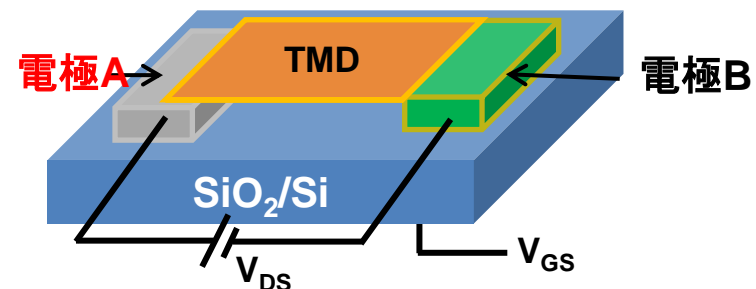
- ✓ ショットキー発電によるTMD太陽電池のデバイス構造最適化
- ✓ 可視光透過率80%以上で発電実証
- ✓ 大面積化

## 新技術の特徴・従来技術との比較

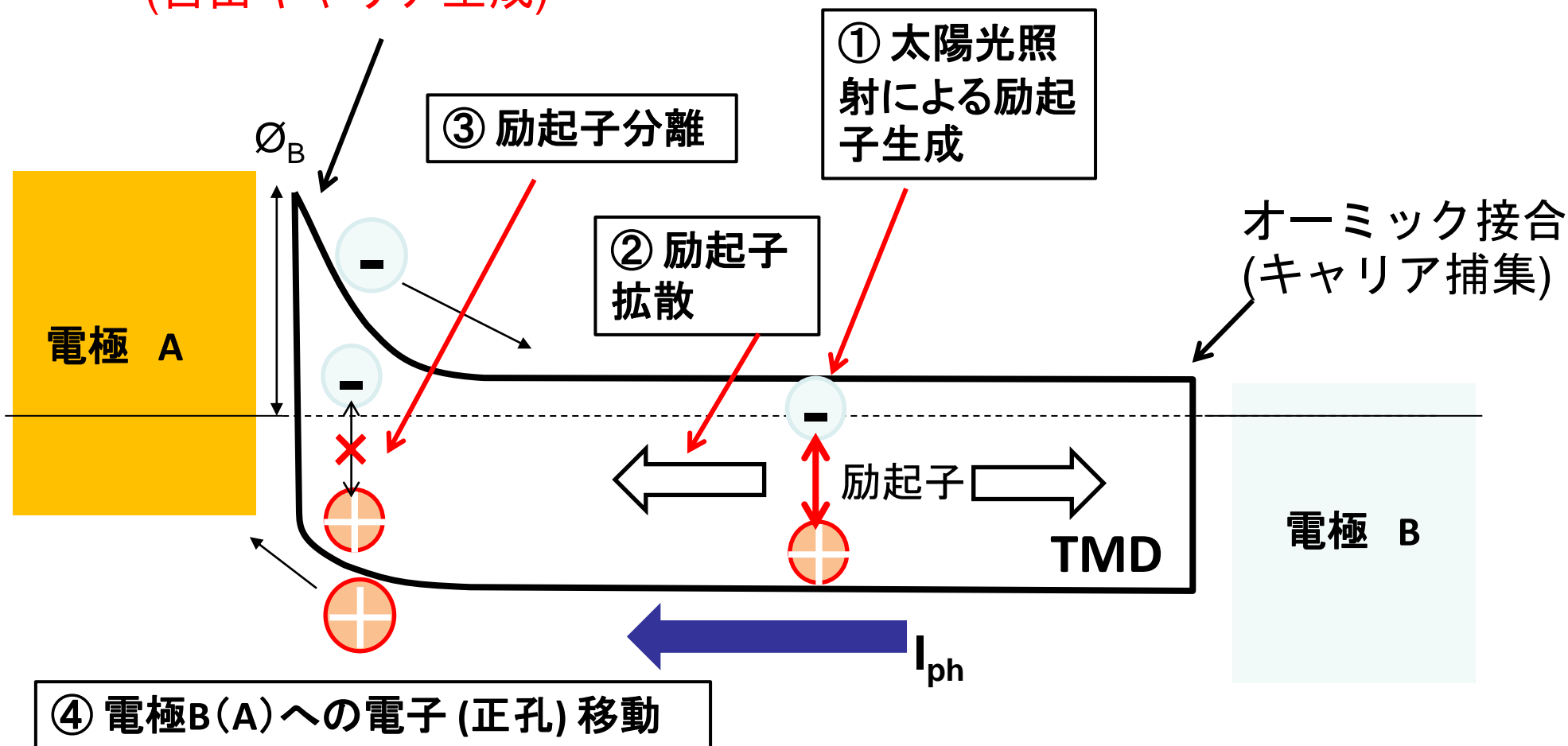
- 従来技術では実現されていない、可視光透過率70%以上の太陽電池を作製することに成功した。
- 従来は透過率が低く使用が限定されていたが、約80%まで可視光透過率が向上できたため、設置可能な場所が大幅に増加した。
- 本技術の適用により、様々な場所での発電が期待される。

## □ 本研究グループで開発したTMDショットキー太陽電池

T. Akama, W. Okita, R. Nagai, C. Li, T. Kaneko, and T. Kato, *Sci. Rep.* 7, 11967 (2017)



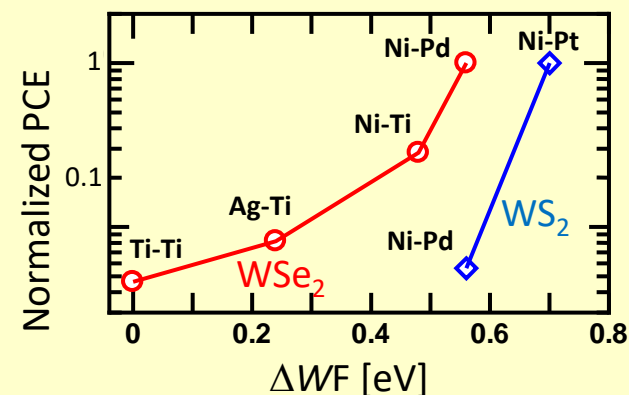
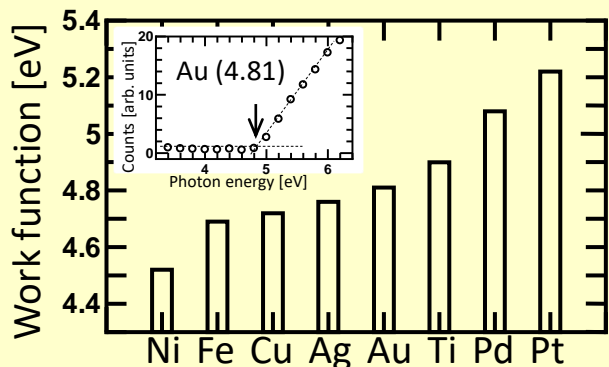
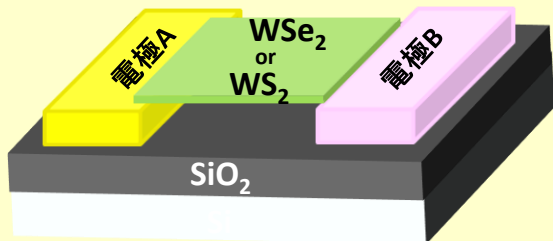
ショットキー接合  
(自由キャリア生成)





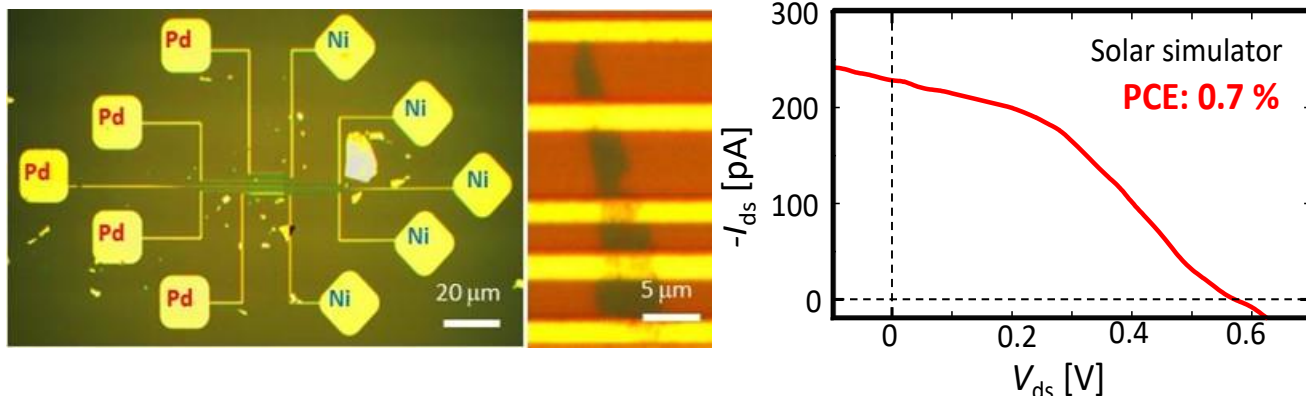
# ショットキー太陽電池の発電性能 (本研究グループのこれまでの成果)

## 電極種の効果



- ✓ PCEが $\Delta WF$ に依存して増加
- ✓ WSe<sub>2</sub>TMDに対してNi-Pdが最適
- ✓ WS<sub>2</sub>-TMDに対してNi-Ptが最適

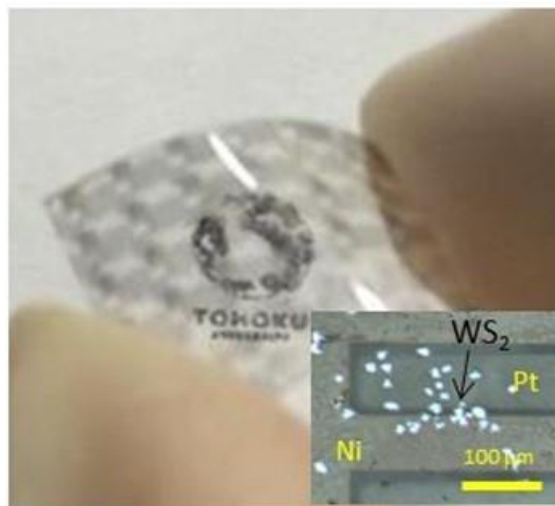
## □ 小規模デバイスによる発電実証実験



TMD(3層以下)太陽電池における  
世界最高発電効率達成

**PCE: 0.7 % (AM1.5G)**

## □ 半透明太陽電池の実証



**半透明太陽電池の  
大面積形成を実証**

T. Akama, W. Okita, R. Nagai,  
C. Li, T. Kaneko, and T. Kato,  
*Sci. Rep.* 7, 11967 (2017)

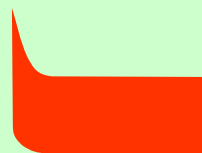
# ショットキー太陽電池の発電性能 (本研究グループのこれまでの成果と課題)

## □ 透過率の更なる向上には？

- ✓ 透明電極(ITO)の利用
- ✓ ITOの仕事関数制御
- ✓ 単層TMDの利用

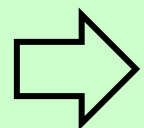


バンド構造



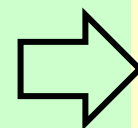
半透明

✓ 電極-TMD界面制御

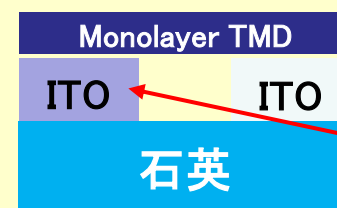


完全透明

× 界面構造制御



## <理想的な構造>



異なる  
仕事関数

完全透明

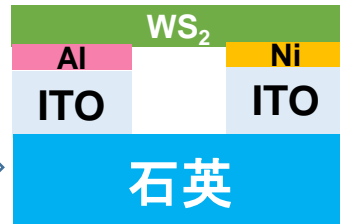
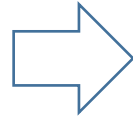
✓ 電極-TMD界面制御

# 透明電極 (ITO) の仕事関数制御

## □ 薄膜を堆積したITOの透過率測定



半透明



完全透明? ( $\tau > 80\%$ )

金属薄膜

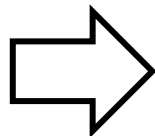
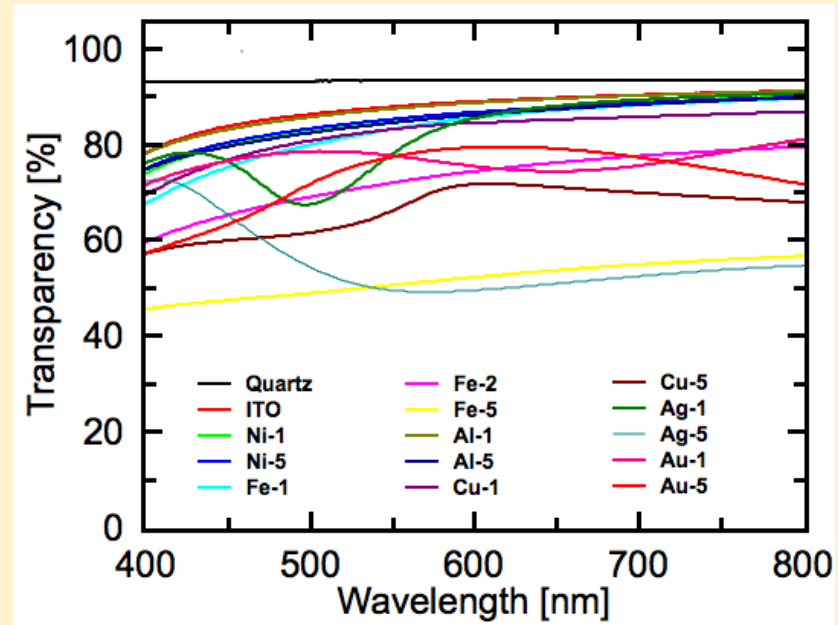
仕事関数 (WF)、透過率測定



ITOの表面に様々な金属薄膜を堆積



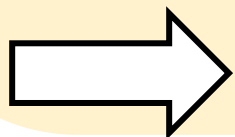
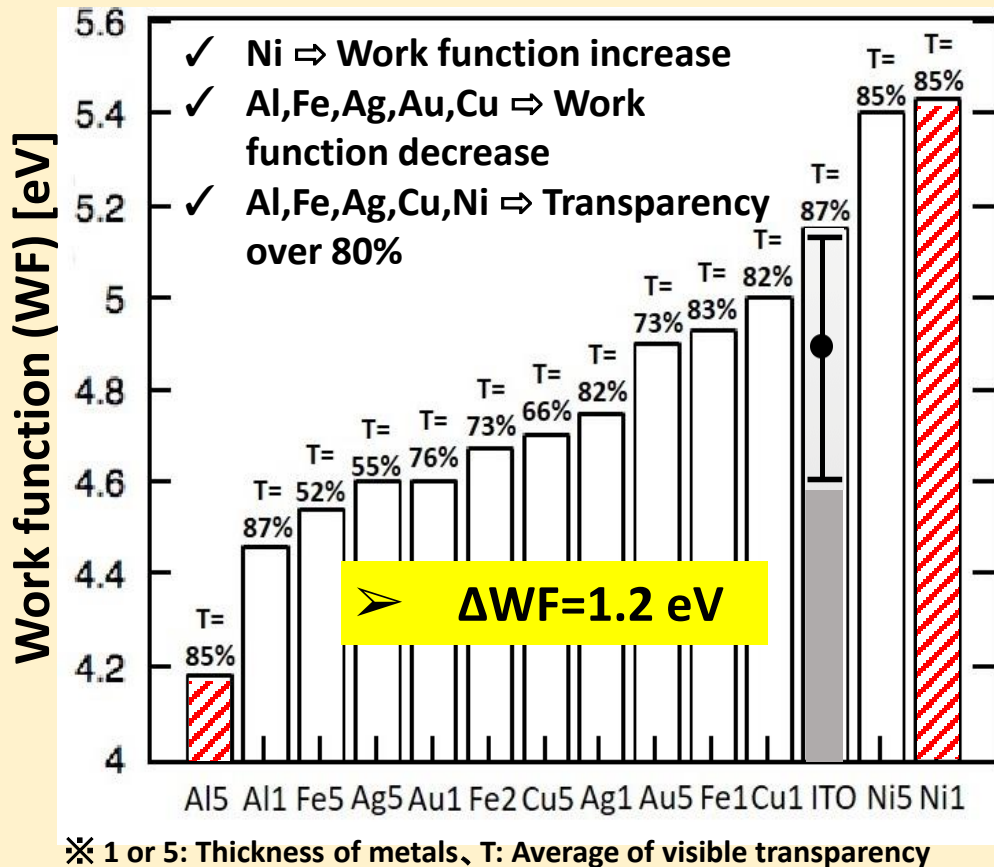
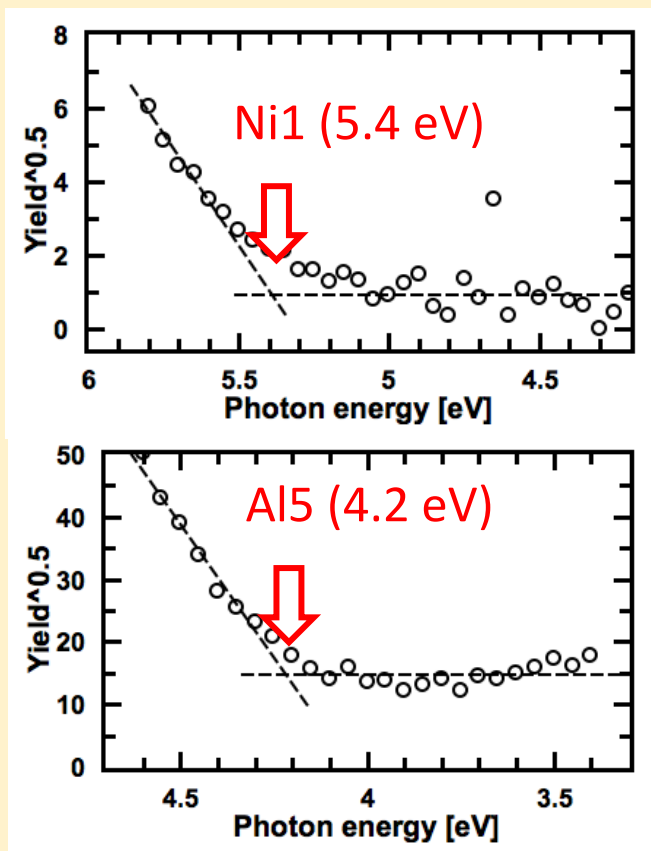
金属薄膜/ITOの透過率



ITO表面に金属薄膜を堆積した場合でも  
高い可視光透過率が維持されることが判明

# ITOの仕事関数制御

金属薄膜を堆積したITOの仕事関数を量子効率計(PYS)により測定



薄膜堆積によりITOの仕事関数が制御可能であることが判明

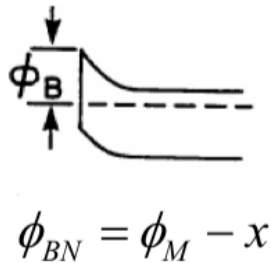


薄膜堆積したITOがTMDショットキー太陽電池の透明電極として利用可能

# ショットキー障壁高さの計測

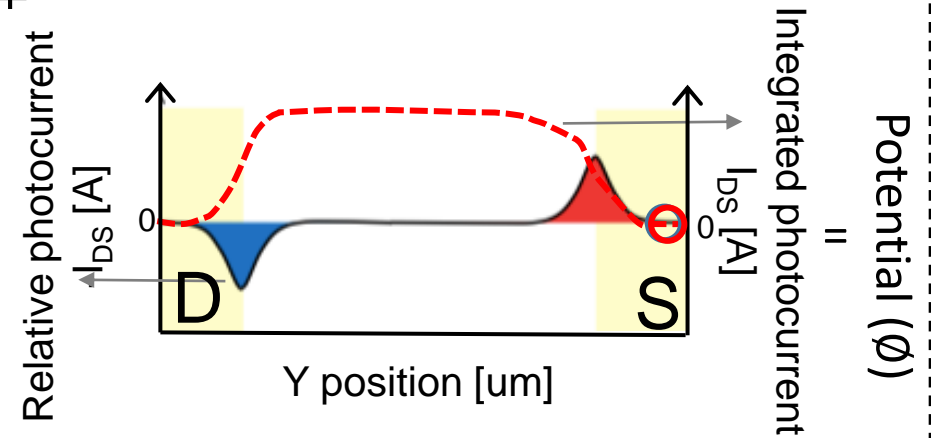
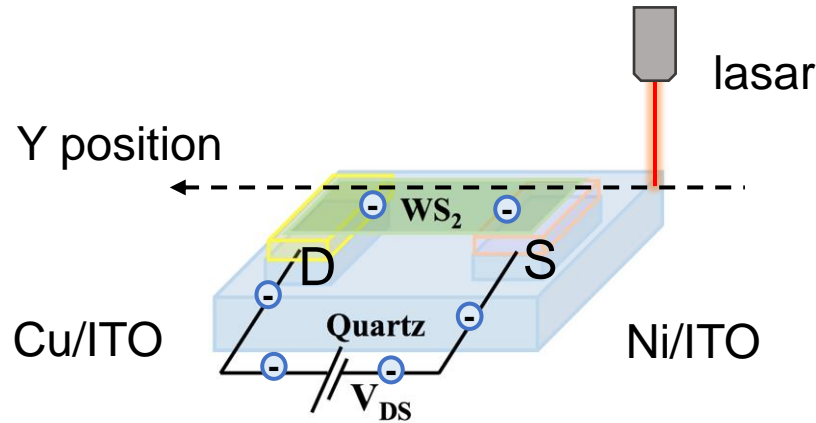
空間分解光励起電流 (SRPC) マッピングによりショットキー障壁高さを計測

## SRPCマッピング手法



デバイス間に様々な電圧( $V_{DS}$ )を印加した状態でレーザーを照射し光電流を計測  
レーザーをスキャンし光誘起電流をスキャン方向に積算

室温かつ大気中での計測が可能  
(=太陽電池の実際の利用環境)



Yamaguchi et. al, ACS nano, **9** (2015), 1, 840–849

Yang et. al, Appl. Phys. Lett. **108** (2016), 083104

$$I_{ph} \propto E$$

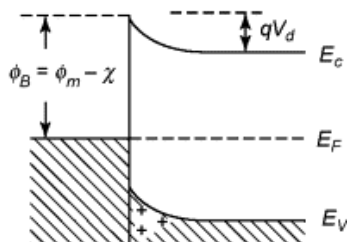
$$\int I_{ph} \propto \int E = \phi$$

SRPCマッピングによりショットキー障壁高さを実測可能

# 金属薄膜/ITO電極とTMD間のショットキー障壁高さ

様々な金属薄膜を堆積したITOとTMD間のショットキー障壁高さをSRPCマッピングで実測

SBH (ショットキー障壁高さ)

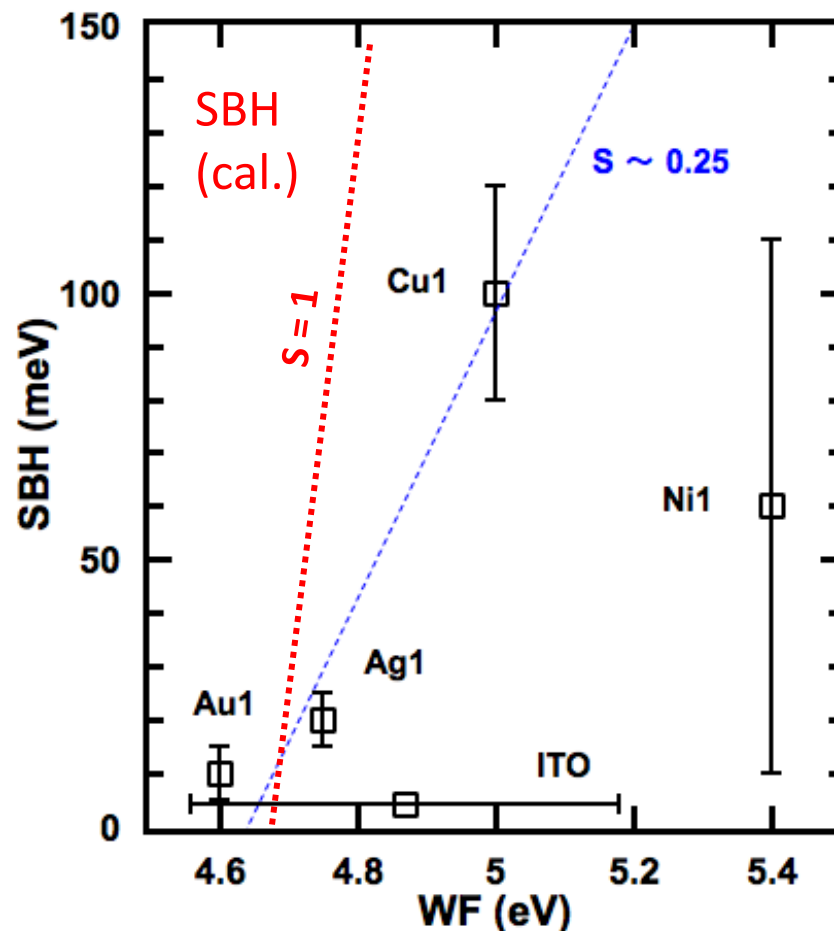


$$SBH (\phi_B) = \phi_m - \chi \quad (S = 1)$$

$\phi_m$  : Work function of electrode

$\chi$  : Electron affinity of  $WS_2$

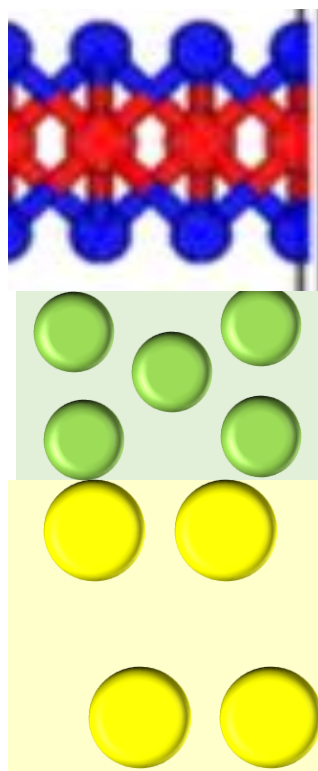
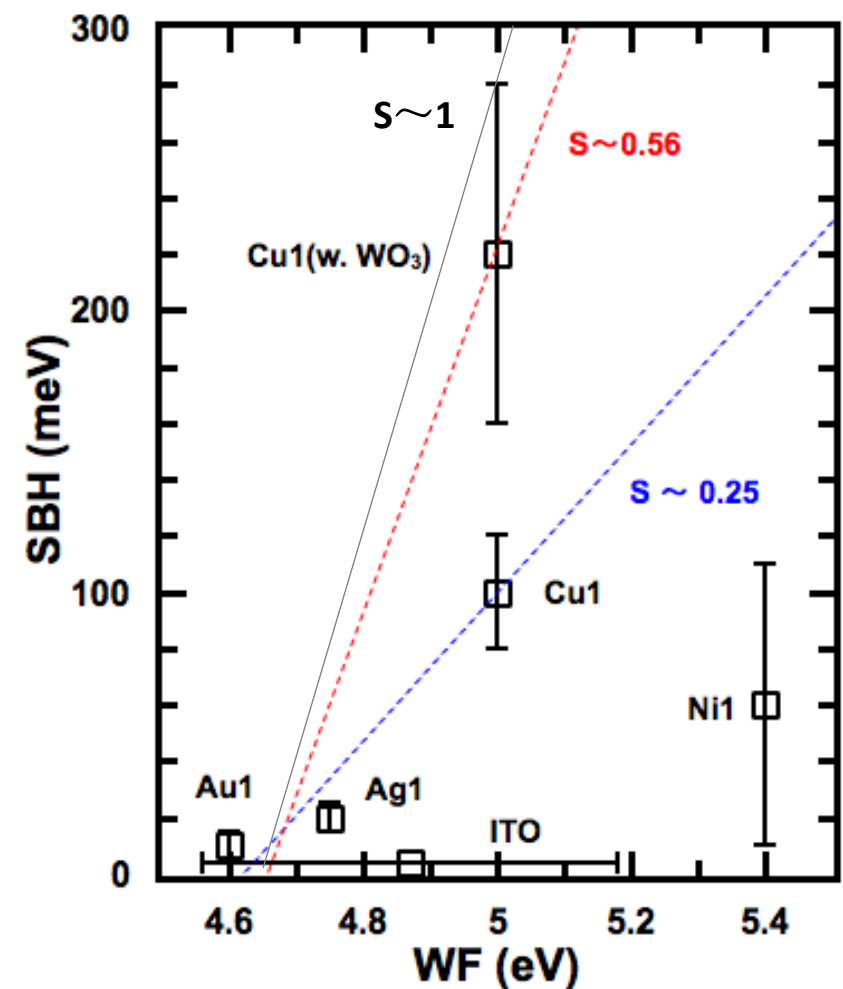
| Electrode | WF [eV] | SBH [meV] | SBH(cal.) [meV] |
|-----------|---------|-----------|-----------------|
| ITO       | 4.55    | 5         | 0               |
| Au/ITO    | 4.60    | 10        | 0               |
| Ag/ITO    | 4.75    | 20        | 50              |
| Cu/ITO    | 5.00    | 100       | 300             |
| Ni/ITO    | 5.40    | 60        | 700             |



- SBHは予想される理論値より著しく低い値であることが判明
- フェルミピンニングの効果でSBHが決定している可能性が示唆

$$SBH = S * (\phi_m - \chi) \quad (S: \text{フェルミピンニング係数})$$

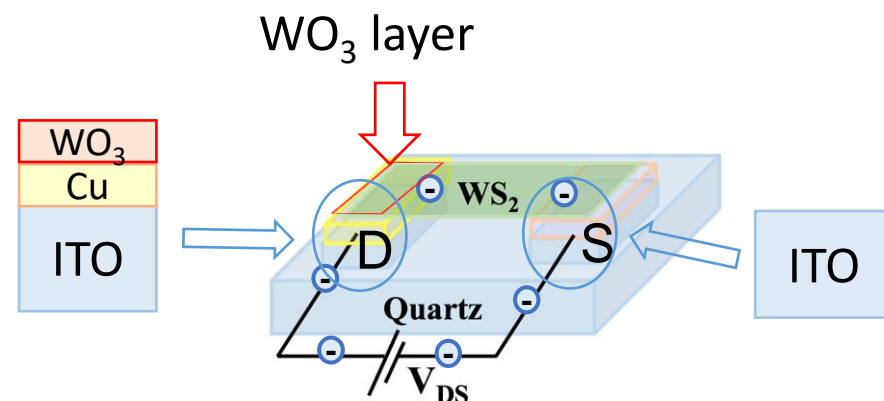
# 発電層側ショットキー障壁高さの向上



WS<sub>2</sub>

WO<sub>3</sub>

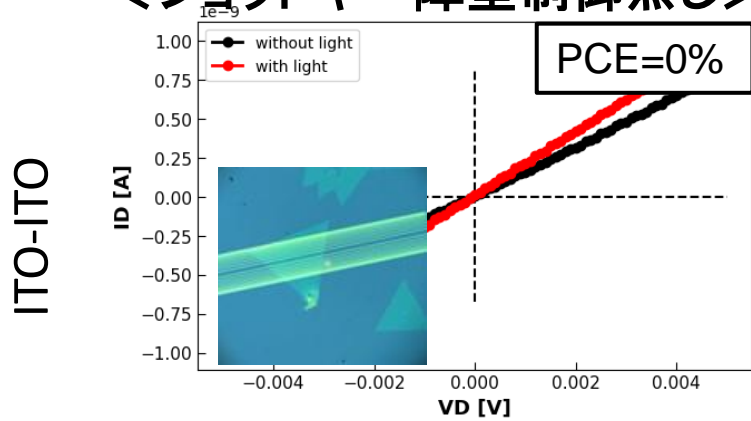
Cu



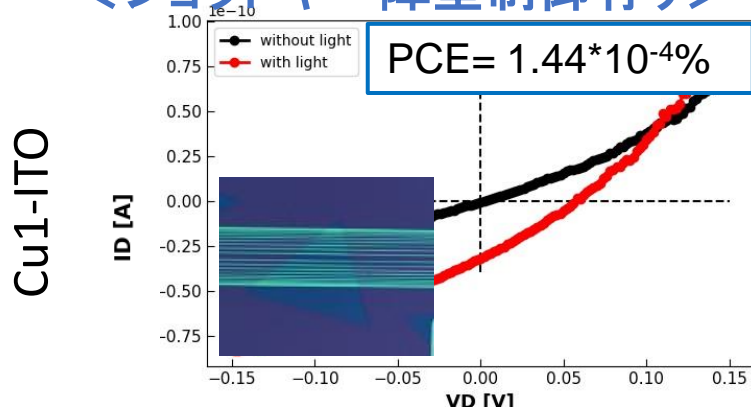
# S: Fermi level pinning factor

- ✓ TMDと金属薄膜間に酸化物薄膜層を追加することでフェルミピンング効果が弱まることが判明
- ✓ 発電層側のショットキー障壁高さを大幅に向上することに成功

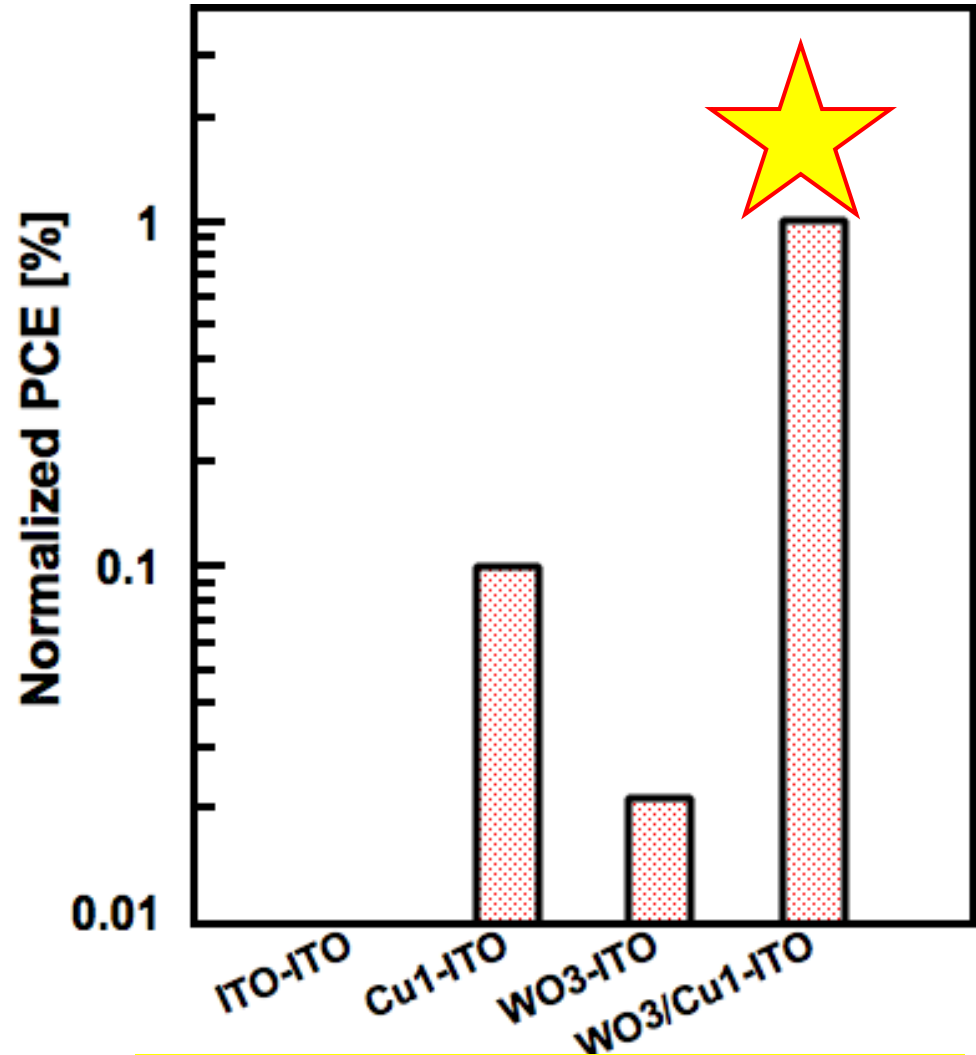
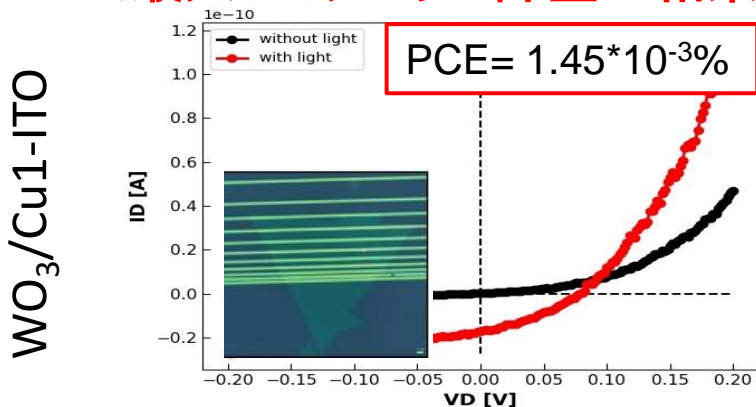
## <ショットキー障壁制御無し>



## <ショットキー障壁制御有り>



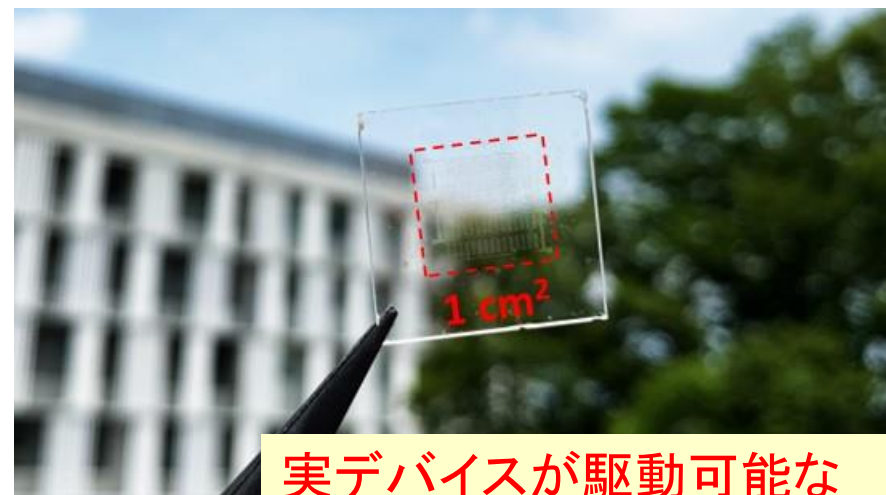
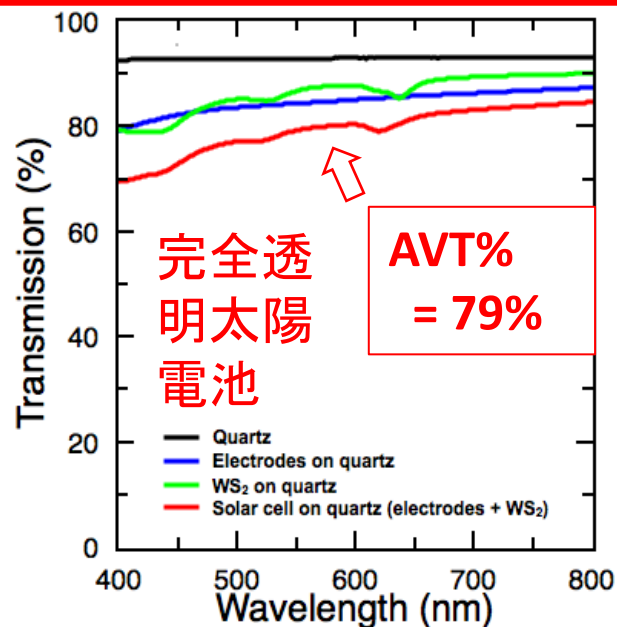
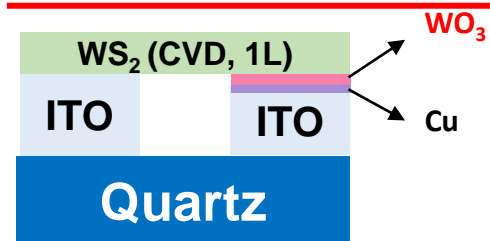
## <最大ショットキー障壁の結果>



ショットキー障壁制御により発電効率が1000倍以上も向上することが判明

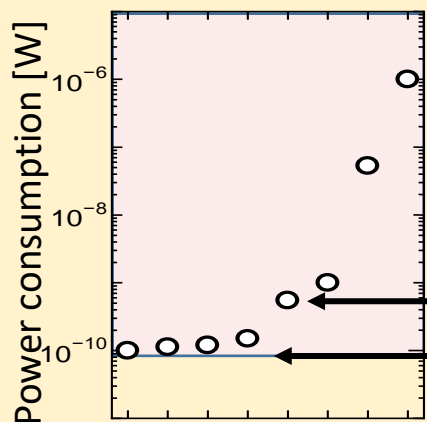


# 完全透明太陽電池の試作



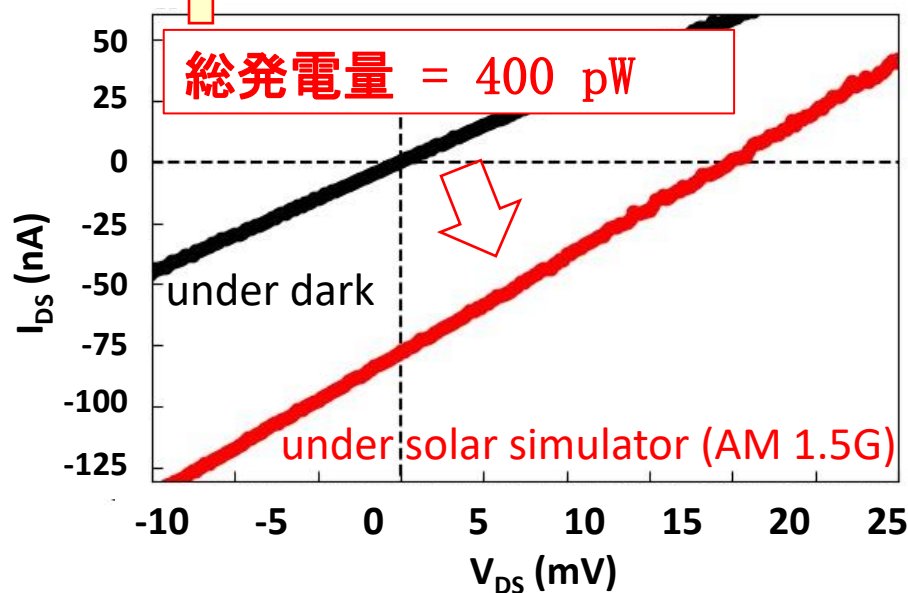
実デバイスが駆動可能なレベルの発電を達成

## <各種電子デバイスと消費電力>



- ✓ D/A Converter: 1 uW (TI DAC7512)
- ✓ CMOS
- ✓ Optical Switch: 0.55 nW (Seiko S 5470)
- ✓ Thermo Sensor: 100 pW

H. Wang & P. P. Mercier, Sci. Rep. 7, 44276, (2017)



- 可視光透過率79%の完全透明太陽電池の試作に成功
- 実デバイスが駆動可能なレベルの発電を達成

## 想定される用途

- 本技術の特徴を生かすことで、ビルの窓ガラス、車のフロントガラス、衣服、人体の肌、眼鏡、ビニールハウス等これまで太陽光発電ができなかった様々な場所でエネルギーを取り出せることになるため、メリットが大きいと考えられる。
- 上記以外に、軽量太陽電池としての効果も期待でき、移動体での発電にも期待される。

## 実用化に向けた課題

- 現在、実用デバイスが駆動可能なレベルの発電量を達成するところまで開発済み。しかし、さらなる発電量の向上が必要である。
- 今後、発電層の高品質化について実験を繰り返し、発電総量の増加に適用していく場合の条件設定を行っていく。
- 実用化に向けて、太陽電池モジュールの面積積化の精度を向上できるよう技術を確立する必要もあり。

## 企業への期待

- 未解決の発電層の高品質化については、“その場観測合成の技術（TMD合成で世界初）”により克服できると考えている。
- 太陽電池や薄膜形成等の技術を持つ企業との共同研究を希望。
- また、従来太陽電池を開発中の企業、環境発電分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 光電変換素子および光電変換デバイス
- 出願番号 : 特願2022-055704
- 出願人 : 東北大学
- 発明者 : 加藤俊顕、何杏、金子俊郎

# お問い合わせ先

東北大学

産学連携機構 総合連携推進部

Website <https://www.rpip.tohoku.ac.jp/jp/>

TEL 022-795-5275

FAX 022-795-5286

E-mail [souren@grp.tohoku.ac.jp](mailto:souren@grp.tohoku.ac.jp)